

Recibido: 27.11.2017 | Aceptado: 30.11.2017

Palabras clave: Índices de sequías y sequías meteorológicas.

# Evolución de los índices de detección de sequías meteorológicas

DANIEL FRANCISCO CAMPOS ARANDA  
*campos\_aranda@hotmail.com*  
PROFESOR JUBILADO DE LA UASLP

## Generalidades

Las sequías son un fenómeno natural recurrente que se presenta en todas las regiones del mundo. La sequía meteorológica (SM) de una zona es el lapso de meses o años, durante el cual la precipitación es inferior a la que comúnmente acontece. Las SM de las zonas semiáridas y subhúmedas son las mejor documentadas debido a que en tales climas se tienen las mayores concentraciones de población humana y, por ende, son las más afectadas

debido a las altas demandas. En los climas húmedos ocurre lo contrario, la disponibilidad de agua es superior a la demanda y, por ello, las sequías no tienen fuertes impactos negativos.

La ocurrencia y severidad de las SM está relacionada con los parámetros climáticos regionales, entre los más importantes están la precipitación media anual (PMA) y la evapotranspiración potencial media anual (ETP). La PMA depende principalmente de las siguientes ocho

características geográficas: latitud, orografía, corrientes oceánicas, circulación del viento, proximidad de océanos y grandes lagos, presión atmosférica, color y textura de la superficie terrestre y condicionantes atmosféricos de origen natural o de las actividades humanas. Los condicionantes atmosféricos son todas las partículas sólidas que están en la atmósfera y juegan un papel importante en los procesos de formación de nubes y lluvia; los de origen natural comúnmente son polvo y granos de sal, los de origen humano son el smog y los residuos de las actividades humanas. Se les puede llamar contaminantes, pero es incorrecto porque los de origen natural no lo son. En cambio, la ETP depende de manera preponderante de las siguientes cuatro características físicas: radiación solar neta, déficit de humedad ambiental, rugosidad de la superficie e índice de área foliar; también tiene una relación estrecha con las temperaturas diurnas y nocturnas.

La PMA y la ETP son variables climáticas vinculadas con las deficiencias en la precipitación que originan las SM. En cambio, un índice de sequías es un indicador basado en cálculos estadísticos que emplea variables climáticas y busca cuantificar las SM, de esta forma permite compararlas con las de climas diferentes; además, favorece el desarrollo de acciones de mitigación correctas y eficientes de sus impactos negativos.

El objetivo de este trabajo es exponer de manera breve la evolución que han tenido los índices de SM, desde la detección de sus valores anuales hasta los de duración mensual de diversos periodos, comienza con índices que únicamente empleaban la precipitación anual (PA),

continúan los que introdujeron la temperatura media y al final, se mencionan los que además emplean la ETP.

### **Detección de sequías anuales** **Técnica basada en la precipitación anual**

Cuando una PA es menor que 75 por ciento de la PMA, ha ocurrido una SM. El número de sequías (NS) anuales, es decir, las veces en que la PA es menor que 0.75 por la PMA, dividido entre el tamaño ( $n$ ) de la serie o muestra de PA y expresado en porcentaje, es en realidad su probabilidad de ocurrencia (% O), ya que cumple con la definición básica de la probabilidad: cociente del número de casos favorables entre el número de casos posibles. Algunos autores prefieren emplear el recíproco ( $n/NS$ ) y lo designan periodo de retorno promedio (PRP) en años de las SM. (Pandey y Ramasastri, 2002).

El indicador de severidad de las sequías es su intensidad media (IM), definida como el déficit relativo medio, es decir, en cada año se le resta a la PMA su PA y se divide entre PMA, se suman todos esos valores y se dividen entre el NS. Una gráfica con PMA en las abscisas y la IM en las ordenadas muestra generalmente un decaimiento exponencial o bien, una curva hiperbólica (Pandey y Ramasastri, 2002). Esta gráfica elaborada para una cierta región geográfica permite la estimación en cualquier localidad de tal zona, de su IM de SM, con sólo disponer del valor de su PMA.

### **Índice de sequías de Pedj**

La variabilidad anual de los registros o series de PA y temperatura media (TM) puede detectarse y analizarse a través de sus índices de anomalía estandari-

zada (IAE), definidos por los cocientes entre la PA menos la PMA divididos entre la desviación estándar de la PA (DEP) y para la TM es el cociente de la diferencia con la temperatura media anual (TMA) entre la desviación estándar de la TM (DET) (Elagib y Elhag, 2011). El valor de la DEP se obtiene con la raíz cuadrada de la suma de las diferencias al cuadrado entre PA menos PMA, divide entre  $n$  menos uno. La magnitud de DET se calcula igual, pero empleando TM menos TMA. Los IAE deben estar evaluados para el mismo periodo de registro de PA y TM. En este párrafo se usan dos conceptos estadísticos simples, la "estandarización" y la "desviación estándar o típica". El primero implica restar la media ( $\mu$ ) y dividir entre la desviación estándar ( $\sigma$ ). Proviene de la transformación de la Ley Normal ( $\mu, \sigma$ ) a la Normal (0,1) o Normal estándar.

El climatólogo D. A. Pedj propuso en 1975 en Rusia un índice para detección de sequías anuales que está definido por la diferencia entre los IAE de la temperatura media menos el de la precipitación. El índice de sequías de Pedj (ISP) fue verificado de manera empírica y se encontró que tiene correlación negativa con la anomalía de la precipitación y varía directamente con la anomalía de la temperatura media, pero lo más importante es que captura ambas direcciones o tendencias. Por lo anterior, cuando el ISP es negativo se tienen años húmedos y cuando es positivo años con sequía. Las sequías meteorológicas leves, moderadas, severas y extremas ocurren cuando el ISP varía entre 0 y 1, 1 y 2, 2 y 3 y más de 3, respectivamente. (Elagib y Elhag, 2011).



La sequía meteorológica ocurre cuando la precipitación anual es menor que 75 por ciento de la precipitación media anual



### Índice de aridez

El Programa Ambiental de las Naciones Unidas (UNEP, por sus siglas en inglés) propuso al inicio de la década de 1990 el cociente PMA/ETP para caracterizar las zonas desérticas y lo llamó índice de sequedad. A partir de este siglo, tal cociente se denomina índice de aridez (IA) y define los climas áridos cuando el IA varía entre 0.050 y 0.200 y a los hiperáridos cuando es menor de 0.050.

En el inicio de este siglo, el índice de aridez anual ( $IA = PA/ETP$ ) se utilizó en estudios de SM (Elagib, 2009), debido a que conceptualmente es correcto al relacionar el abastecimiento atmosférico (precipitación, P) y la demanda atmosférica (evapotranspiración potencial, ETP). Debido a su sencillez de cálculo el IA se ha empleado en estudios regionales y de grandes territorios (Elagib, 2009). Comúnmente, la estimación de la ETP se realiza por medio de métodos empíricos, como los de Thornthwaite y Hargreaves-Samani, que utilizan datos de temperatura.

La serie cronológica de valores anuales de IA se ordena de mayor a menor, se conserva el año respectivo y se obtiene la mediana, el fin es definir con los valores menores a ella los años con sequía. Después se trabaja con tales datos para encontrar los porcentajes de tipos de SM (leves, moderadas, severas y extremas) y sus años correspondientes.

### Detección de sequías mensuales

#### Índice de reconocimiento de sequías

Una generalización del IA en estos dos aspectos es que se aplica en lapsos de  $k$  meses y se estandariza, cabe mencionar que  $k$  es la duración de la SM en meses; así que condujo a un nuevo co-



ciente designado de índice de reconocimiento de sequía (RDI, por sus siglas en inglés) (Tsakiris y Vangelis, 2005). Su cálculo inicia con el cociente ( $ai$ ) entre la precipitación mensual acumulada y la respectiva evapotranspiración potencial, en los  $k$  meses considerados como duración de la SM de cada año  $i$  del registro procesado (Tsakiris y Vangelis, 2005). Cuando  $k = 12$  en el lapso de enero a diciembre el RDI coincide con el IA.

Al aceptar que los valores de  $ai$  pueden representarse probabilísticamente por la distribución Log-Normal, los valores estandarizados del RDI (RDIST) se obtienen dividiendo  $yi$  menos YM entre DEY; así que  $yi$  es igual al logaritmo natural de  $ai$ , mientras que YM y DEY son la media aritmética y la desviación estándar de  $yi$ . Los valores positivos del RDIST indican años húmedos y los negativos son sequías anuales, con la severidad siguiente: leves hasta

-1.00, moderadas fluctuando de -1.00 a -1.50, severas son de -1.50 a -2.00 y, por último, son extremas las menores a -2.00 (Tsakiris y Vangelis, 2005).

#### Índice de severidad de sequías de Palmer

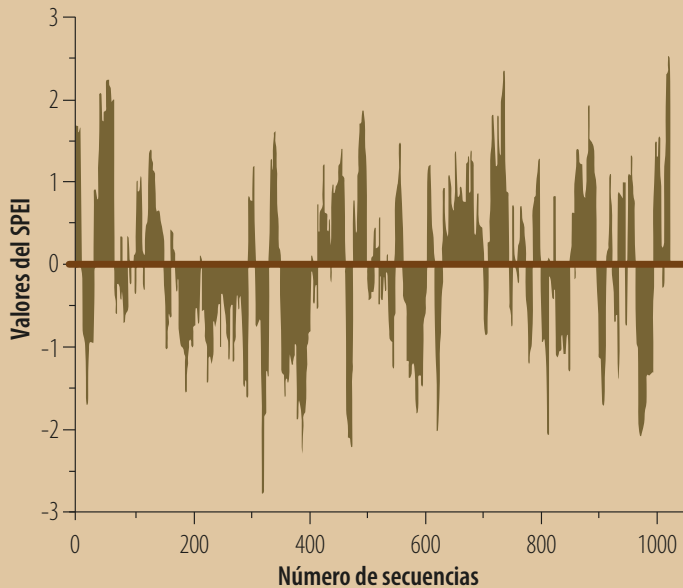
Wayne C. Palmer (1965) propuso el índice estandarizado de sequía de Palmer (PDSI, por sus siglas en inglés), el cual realiza un balance mensual de humedad en el suelo. Utiliza datos mensuales de precipitación y de ETP. Este índice ha sido criticado por no tener un cálculo simple, además de no permitir considerar la duración en meses de las SM y de no ser suficientemente sensible a los cambios inducidos en la precipitación y la temperatura, al intentar caracterizar las SM futuras.

#### Índice de precipitación estandarizada

El índice de precipitación estandarizada (SPI, por sus siglas en inglés) se basa en

Figura 1.

## Evolución del SPEI de duración 12 meses en la estación climatológica Zacatecas, México



un enfoque probabilístico de la precipitación mensual (McKee, Doesken y Kleist, 1993) y ha mostrado un uso eficiente de la información disponible; su defecto principal radica en utilizar sólo tales datos e ignorar otros indicadores de las sequías, como la temperatura y la ETP.

Definida la duración de la SM en meses ( $k$ ), comienza por obtener todas las secuencias posibles de tal duración en el registro, las cuales se obtienen como sumas móviles (McKee, Doesken y Kleist, 1993). Una suma móvil son los valores que se obtienen al efectuar sumas, de un número determinado ( $k$ ) y constante de elementos, tomados de manera secuencial de uno por uno, a lo largo de una serie de magnitudes dato, cuyo número es ND. El número de secuencias (NS) o sumas móviles que se pueden formar es  $NS = ND - k + 1$ .

Por ejemplo, si se tiene la secuencia de cinco números: 1, 2, 3, 4 y 5. Como

el número de datos es  $ND = 5$ , entonces podrán formarse tres secuencias de tamaño  $k = 3$ , que son:  $1 + 2 + 3 = 6$ ,  $2 + 3 + 4 = 9$  y  $3 + 4 + 5 = 12$ . Las de tamaño  $k = 2$  serán 4: 3, 5, 7 y 9.

Por ejemplo, para la sequía estacional con  $k = 4$  la primera secuencia será la suma del mes uno al cuarto, la segunda secuencia será la suma del mes dos al quinto y así sucesivamente. El número de secuencias o datos (ND) será:  $ND = 12 \cdot NA - k + 1$ , NA representa el número de años del registro disponible ( $NA > 30$ ), los cuales comúnmente inician en enero y terminan en diciembre.

Enseguida se ajusta la función de distribución de probabilidades Gamma Mixta de dos parámetros a la serie de ND calculada, ya que tal muestra puede contener ceros. Después se emplea una aproximación numérica racional para convertir la probabilidad acumulada estimada con distribución Gamma Mixta, en la variable Normal estandarizada  $Z$  de media cero y varianza unitaria, la cual define el índice SPI (McKee, Doesken y Kleist, 1993). La definición de las SM leves, moderadas, severas y extremas se realiza con base en los valores numéricos citados para el RDist, al igual que en los índices SPEI y SPDI siguientes.

### Índice SPEI

La tendencia actual busca la caracterización de las SM a través de índices basados en múltiples variables (Hao y Singh, 2015), cuyos principales enfoques de construcción son el uso del balance de humedad en el suelo y de las variables ocultas. Una variable oculta o latente se forma con una diferencia o cociente de variables que tienen gran significado físico en las SM; por ejemplo,



### DANIEL FRANCISCO CAMPOS ARANDA

Es doctor en Ingeniería con especialidad en Aprovechamientos Hidráulicos en la Facultad de Ingeniería de la UNAM. Obtuvo la medalla Gabino Barreda que otorga la UNAM y el Premio Nacional Francisco Torres H. de la Asociación Mexicana de la Hidráulica. Actualmente es profesor jubilado de la UASLP.



la precipitación y la ETP, así se propuso el RDI con el cociente de tales variables y el índice de precipitación- evapotranspiración estandarizado (SPEI, por sus siglas en inglés) con su diferencia, que implica una condición de déficit o exceso de agua (Vicente Serrano, Beguería y López Moreno, 2010).


El SPEI es de cálculo similar al SPI y además es sensible a las alteraciones inducidas en los registros históricos de precipitación y temperatura, de acuerdo con las expectativas que presenta el cambio climático en tal zona o región para el estudio de las SM futuras (Vicente Serrano, Beguería y López Moreno, 2010). Al igual que el SPI, las gráficas de evolución de sus valores calculados para una cierta duración, permiten la definición exacta del inicio y terminación de los periodos de sequía y de la fecha de ocurrencia de sus valores extremos. Una de tales gráficas se muestra en la figura 1.

El cambio fundamental con el SPI radica en utilizar como datos de partida las diferencias de la precipitación menos la ETP, ambas mensuales. Como la mayoría son negativas, se obtienen muchas sumas móviles menores que cero y entonces la función de distribución de probabilidades que debe ajustarse a las secuencias formadas debe ser de tres parámetros de ajuste, con la ubicación menor que la secuencia mínima (Vicente Serrano, Beguería y López Moreno, 2010).

### Índice de sequías de Palmer estandarizado

Un estudio comparativo de los índices PDSI, SPI y SPEI (Ma, Ren, Yuan, Jiang, Liu, Kong y Gong, 2013) encontró defi-

ciencias y limitaciones en la diferencia  $d$  utilizada por el SPEI, como ecuación del balance climático mensual y propone emplear la calculada dentro del procedimiento operativo del índice de Palmer (PDSI), llamada desviación de la humedad ( $dh$ ), que es la diferencia entre la precipitación observada y una estimada para las condiciones normales del clima de la región, la cual se calcula con base en los resultados del balance hídrico del suelo.

Al procesar las diferencias  $dh$  con el enfoque probabilístico del SPI, se ha desarrollado un nuevo índice de sequías de Palmer estandarizado, (SPDI, por sus siglas en inglés), que engloba la parte teórica rescatable del PDSI, la eficiencia computacional (McKee, Doesken y Kleist, 1993) del SPI y reproduce la sensibilidad del SPEI para considerar los cambios climáticos probables (Vicente, Beguería y López, 2010). 

#### Referencias bibliográficas:

- Elagib, N. A. y Elhag, M. M. (2011). Major climate indicators of ongoing drought in Sudan. *Journal of Hydrology*, 409(3-4), pp. 612-625.
- Ma, M., Ren, L., Yuan, F., Jiang, S., Liu, Y., Kong, H. y Gong, L. (2014). A new standardized Palmer drought index for hydro-meteorological use. *Hydrological Processes*, 28(23), pp. 5645-5661.
- Pandey, R. P. y Ramasastry, K. S. (2002). Incidence of droughts in different climatic regions. *Hydrological Sciences Journal, Supplement*, 47, pp. S31-S40.
- Tsakiris, G. y Vangelis, H. (2005). Establishing a drought index incorporating evapotranspiration. *European Water*, 9-10, pp. 3-11.
- Vicente Serrano, S. M., Beguería, S. y López Moreno, J. I. (2010). A multiscalar Drought Index sensitive to Global Warming: The Standardized Precipitation Evapotranspiration Index. *Journal of Climate*, 23(7), pp. 1696-1718.